

Großversuche zur Prüfung der Vorhersagefähigkeit der im SFB 528 entwickelten Rechenmodelle

Anett Brückner¹, Regine Ortlepp², Frank Schladitz³, Manfred Curbach⁴

Zusammenfassung: Ein Ziel des Sonderforschungsbereiches 528 war, das Verbundsystem auf allen Skalenebenen so präzise beschreiben zu können, dass eine hinreichende Genauigkeit bei der Berechnung des Tragverhaltens von Stahlbetonbauteilen mit Textilbetonverstärkung nicht nur bei der Nachrechnung, sondern auch bei der Prognose erreicht wird. Die Vorhersagequalität von Tragfähigkeiten für die Biege-, Querkraft- und Normalkraftverstärkung wurde mit Hilfe von Großversuchen nachgewiesen, deren Ergebnisse vor der Berechnung nicht bekannt waren. Anhand der bereitgestellten Materialparameter und Geometriedaten wurde in den numerischen Teilprojekten sowie in einem experimentell orientierten Teilprojekt das Tragverhalten prognostiziert. Danach wurden die Versuche durchgeführt. Die prognostizierten Traglasten wurden durch die Experimente bestätigt. Der vorliegende Beitrag fokussiert auf die Querkraftverstärkung, da eine detaillierte Beschreibung aller Versuche den Rahmen sprengen würde.

Summary: One aim of the developments in the SFB 528 was the description of the compound system as precisely as possible at all scale levels that an adequate precision is not achieved by reinforced concrete components at the calculation of the load carrying behaviour with TRC reinforcements only at the historical calculation but also at the forecast. The forecast quality of load-capacities for the bend, shear and normal force strengthenings was proved with the help of large-scale experiments whose results were not confessed before the calculation. With the provided material parameters and geometry data the load carrying behaviour was forecast in the numeric subprojects as well as in an experimentally oriented subproject. After that the tests were carried out. The forecast loads were confirmed by the experiments. The paper on hand focuses on the shear strengthening since a detailed description of all tests would go beyond the scope.

¹ Dipl.-Ing., Institut für Massivbau, TU Dresden

² Dr.-Ing., Institut für Massivbau, TU Dresden

³ M.Sc., Institut für Massivbau, TU Dresden

⁴ Prof. Dr.-Ing., Institut für Massivbau, TU Dresden

1 Einleitung

Kann die Tragfähigkeit eines Bauteils nach geltenden Bemessungsregeln und -vorschriften nicht mehr nachgewiesen werden, ist eine Verstärkung oder ein Neubau erforderlich. Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton (TRC) sind für verschiedene Anwendungen geeignet, wie zahlreiche experimentelle Untersuchungen belegen. Geprüft wurden biegeverstärkte Platten (BÖSCHE [1], WEILAND [2]), querkraft- und torsionsverstärkte Balken (ORTLEPP ET AL. [3], SCHLADITZ & CURBACH [4]) sowie normalkraftverstärkte Stützen (ORTLEPP ET AL. [5], [6]). Neben verbesserten Eigenschaften der Gebrauchstauglichkeit (Rissbreite, Durchbiegung) konnten vor allem deutliche Traglaststeigerungen nachgewiesen werden.

Für praktische Anwendungen reichen die experimentellen Nachweise allein jedoch nicht aus. Notwendig sind analytische und ingenieurmäßige Berechnungsmodelle, die eine Vorhersage der Tragfähigkeit ermöglichen. Durch detaillierte Analysen des Tragverhaltens wurde versucht, die Einflussfaktoren für die Wirksamkeit der Verstärkung, wie z.B. die Bauteilgeometrie oder Grenzwerte für mögliche Verstärkungsgrade, einzugrenzen. Die abgeleiteten Stoffgesetze und Rechenmodelle wurden durch vergleichende Berechnungen an kleinformatigen Probekörpern geprüft.

Im vorliegenden Beitrag wird vorrangig das ingenieurmäßige Rechenmodell für die Querkraftverstärkung vorgestellt und auf experimentell geprüfte Bauteile mit praxisrelevanten Abmessungen angewendet. Beschrieben werden die notwendigen Eingangsgrößen sowie deren Ermittlung. Der abschließende Vergleich mit den geprüften Tragfähigkeiten der unverstärkten und verstärkten Bauteile zeigt die Eignung aber auch Grenzen der Modelle.

Versuchsergebnisse von großformatigen Probekörpern für die Untersuchung der Biege- und Normalkraftverstärkung sowie Berechnungsmodelle für deren Berechnung werden abschließend mit Verweisen auf bereits veröffentlichte Beiträge kurz zusammengefasst.

2 Querkraftverstärkung

2.1 Materialeigenschaften

Für die Herstellung der Stahlbetongrundkörper wurde handelsüblicher Transportbeton der Festigkeitsklasse C20/25 verwendet (Tabelle 1). Die Haftzugfestigkeiten dieser Betone liegen mit durchschnittlich $1,7 \text{ N/mm}^2$ im Bereich der Mindestanforderung, die nach den deutschen Richtlinien RL SIB [7] oder ZTV-ING 03 [8] an zu verstärkende Oberflächen gestellt werden. Im Versuch sind so die übertragbaren Kräfte in der Verbundfuge von Stahlbetonbalken und Verstärkungsschicht auf die minimal zulässigen Werte begrenzt.

Tabelle 1: Regelprüfdaten Altbeton**Table 1:** Material properties of the old concrete

Balken Nr.	Druckfestigkeit ²⁾			E-Modul ²⁾	Spaltzugfestigkeit ¹⁾
	$f_{cm,28d}^{cube}$ [N/mm ²]	$f_{cm,cube}^{3)}$ [N/mm ²]	$f_{cm,zyl}^{4)}$ [N/mm ²]	$E_{cm}^{3)}$ [N/mm ²]	$f_{ct,sp}^{3)}$ [N/mm ²]
PB-GV-S/0	23,7	37,4	30,2	29.970	2,75
PB-GV-S/2	27,6	44,6	36,0	25.730	3,09
PB-GV-S/3	24,5	37,5	30,3	27.750	2,90

¹⁾ DIN 1048-5, Würfel 150/150/150 mm

³⁾ am Prüftag des Bauteils

²⁾ DIN 1048-5, Zylinder 150/300 mm

⁴⁾ $f_{cm,zyl} = 0,95 \times 0,84 f_{cm,cube}$

Zur Bewehrung der Probekörper wurde Stabstahl BSt 500 verwendet. Die Materialkennwerte sind in Tabelle 2 zusammen gefasst. Auf die Bewehrungsführung wird im nachfolgenden Abschnitt eingegangen.

Tabelle 2: Kennwerte der Stahlprüfung**Table 2:** Properties of steel reinforcement

Durchmesser d [mm]	Streckgrenze f_{ym} [N/mm ²]	Zugfestigkeit f_{tm} [N/mm ²]	E-Modul E_{sm} [N/mm ²]
6	504	584	188.630
8	529	602	190.820
16	569	671	202.230
28	572	680	203.720

Die Querkraftverstärkung der Plattenbalken wurde mit einem multiaxialen Gelege (Bild 1a) bewehrt. Das Gelege ist mit einer Garnneigung von $\pm 45^\circ$ in den beiden Tragrichtungen an den theoretischen Verlauf der Hauptspannungstrajektorien angepasst. Der Stützfaden in Längsrichtung der Plattenbalken dient der Formstabilität des Geleges. Die Zugfestigkeit des Geleges im Verbund mit dem Feinbeton wurde im Dehnköperversuche nach JESSE [9] mit 1.990 bis 2.070 N/mm² bezogen auf die Garnquerschnittsfläche geprüft (Bild 1b).

Für die Bemessung der Querkraftverstärkung ist neben der Zugfestigkeit auch die Verankerungslänge des Verbundwerkstoffs erforderlich. Die Verankerungslänge ist von der maßgebenden Versagensebene abhängig. Nach den Untersuchungen von ORTLEPP [10] ist zwischen der Versagensebene im Altbeton, in der Verbundfuge von Altbeton und Verstärkungsschicht,

der Ebene der ersten Textillage und der Verbundfläche zwischen Einzelgarn und Feinbeton zu unterscheiden (Bild 2).

Die Versagensebenen c) bis e) (Bild 2) können durch eine entsprechende Vorbehandlung der Betonoberfläche sowie durch die Wahl geeigneter Gelegeparameter (Garnfeinheit, Garnabstände) vermieden werden. Ein Versagen in der Ebene des Altbetons hingegen wird durch die Haftzugfestigkeit des bestehenden Betonbauteils bestimmt (ORTLEPP [10]).

Die notwendige Verankerungslänge zur Vermeidung eines Altbetonversagens kann mit Hilfe spezieller Verbundversuche ermittelt werden. Der hierfür von ORTLEPP entwickelte Probekörper ist in Bild 3 dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung des Versuchsaufbaus ist in [10] nachzulesen.

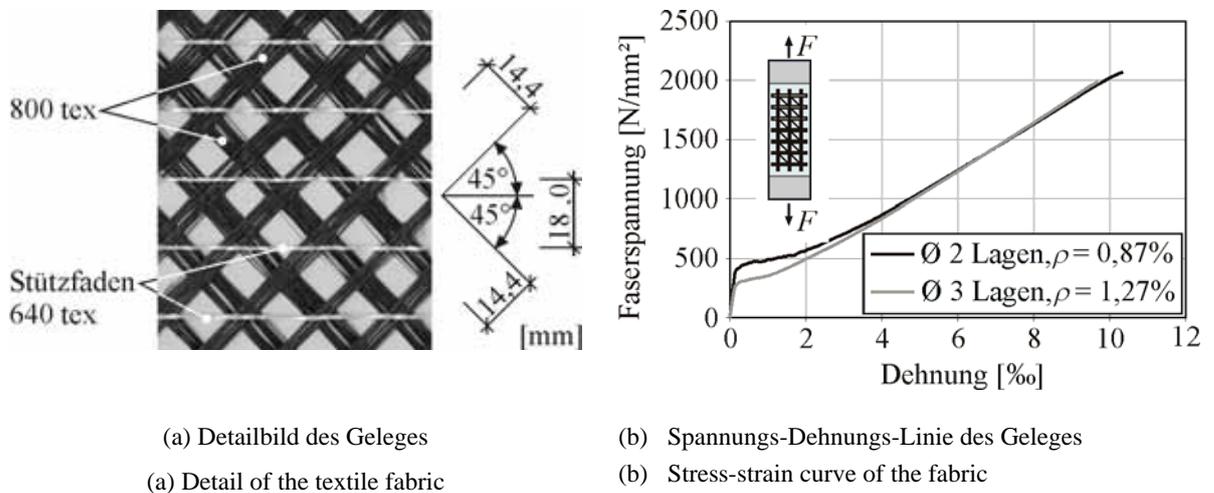


Bild 1: Carbongelege zur Querkraftverstärkung

Fig. 1: Fabric of carbon fibres for shear strengthening

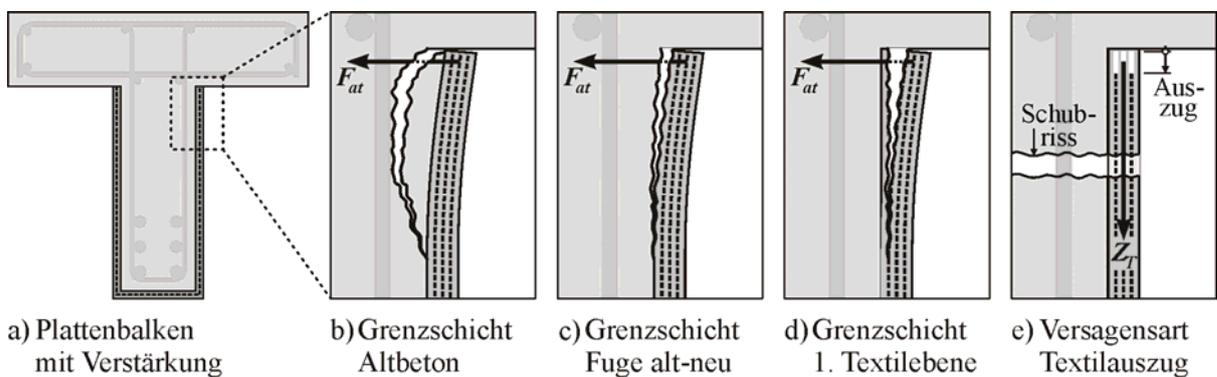


Bild 2: Versagensebenen im Verankerungsbereich von TRC-Verstärkungen (nach ORTLEPP [10])

Fig. 2: Failure layers in the anchorage range of TRC strengthenings

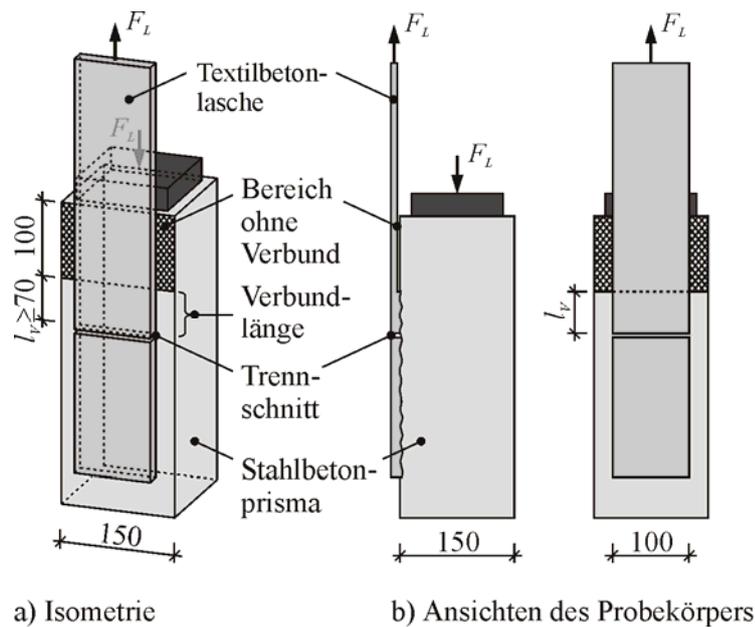


Bild 3: Probekörper zur Prüfung der Verbundtragfähigkeit (nach ORTLEPP [10])

Fig. 3: Specimen for the test of the load-capacity of the bond

Für das Carbongewebe zur Verstärkung der Plattenbalken ist nach den experimentellen Verbunduntersuchungen eine Verankerungslänge von ca. 7 cm erforderlich.

2.2 Geometrie der Probekörper

Die Querkrafttragfähigkeit verstärkter Bauteile wurde an Plattenbalken mit einer Querschnittshöhe von 70 cm geprüft (Bild 4). Die Stützweite liegt mit einer Schubslankheit a/d von 4 im oberen Bereich des Kani'schen Schubtals, um zwischen Einzellast und Auflager ungestörte B-Bereiche nach de Saint-Venant für die Analyse der Stegverformungen zu erreichen. Diese Analysen sind ebenfalls Grund für den unterschiedlichen Schubbewehrungsgrad der beiden Balkenhälften.

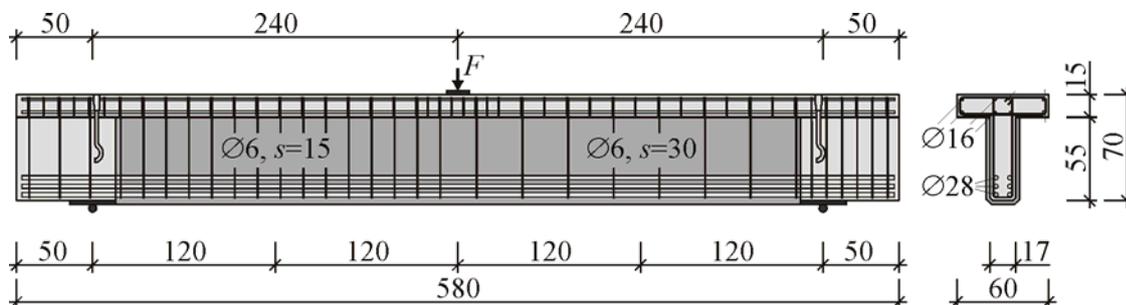


Bild 4: Geometrie und Bewehrungsführung der Probekörper

Fig. 4: Geometry and reinforcement of the specimen

2.3 Ingenieurmäßiges Berechnungsmodell

Die Querkrafttragfähigkeit eines Stahlbetonbauteils setzt sich aus mehreren Tragwirkungen zusammen. Die Tragfähigkeit der Stahlbügelbewehrung kann nach den Bemessungsverfahren des CEB-FIP MC 2010 [11], der FIP RECOMMENDATIONS (1999) [12] oder der DIN 1045-1 [13] mit Hilfe eines parallelgurtigen Fachwerks bestimmt werden. Alle weiteren Traganteile z. B. infolge Vorspannung werden addiert. Verstärkungen mit Faserverbundkunststoffen (FVK) werden in der Regel ebenfalls mit Hilfe eines Fachwerkmodells nachgewiesen (CONCRETE SOCIETY [14], ACI 440.2R-08 [15]), obwohl die Verstärkung je nach Bauteilquerschnitt außerhalb der Biegedruckzone enden kann. Der Druckgurt der Verstärkung wird unabhängig von der Dehnungsverteilung im Stahlbetonbauteil in Höhe der Endverankerung der Verstärkung angenommen.

Für Verstärkungen mit textilbewehrtem Beton wird der Anschluss der schrägen Zugstreben an das Stahlbetonbauteil mit dem in Bild 5 dargestellten Stabwerk erklärt (BRÜCKNER [16]). Die doppelt geneigten Druckstreben idealisierten den bogenförmigen Lastabtrag nach der Vorstellung der Hauptspannungstrajektorien. Über die textilbewehrten Zugstreben werden mehrere Druckbögen mit Zugband miteinander gekoppelt (Bild 5a).

Die Verankerung der schrägen Zugstreben erfolgt im Querschnitt über einen Druckbogen mit Zugband (Bild 5b). Die Umlenkkräfte dieses Druckbogens stützen sich im Längsschnitt des Modells (Bild 5c) auf den schrägen Druckstreben an der Stelle des Neigungswechsels ab. Das Zugband im Querschnitt wird durch die Haftzugfestigkeit des Alt- und Feinbetons realisiert. Eine Verankerung in der Druckzone ist nach dem vorgeschlagenen Modell nicht notwendig.

Der vertikale Abstand a_R zwischen dem Neigungswinkel innerhalb der Druckstrebe und der Unterkante der Platte wird durch die Verankerungslänge der textilen Bewehrung l_V und den Neigungswinkel ψ des Druckbogens im Querschnitt bestimmt. Aufgrund der Neigung der Zugstreben ist die vertikale Projektion der Verankerungslänge maßgebend (Bild 5a).

Die schrägen Druckstreben werden im Längsschnitt direkt an die Einzellast angeschlossen, da angenommen wird, dass die Verstärkung vollständig im Bereich der Biegezugzone liegt. Diese Annahme führt zu einer Geometrieabhängigkeit des Stabwerkmodells. Je nach Entfernung der Zugstrebe von der Einzellast sind die oberen Druckstreben $D_{b,i}$ unterschiedlich geneigt. Die Neigung der Druckkräfte führt zu einer Entlastung der schrägen Zugstreben.

Mit zunehmendem Abstand zur Einzellast wird der Neigungswinkel γ_b der Druckstreben immer flacher, so dass unmittelbar am Auflager nur noch ein geringer Querkraftanteil über die obere Druckstrebe übertragen wird. Die angeschlossene Zugstrebe ist am höchsten beansprucht. Vernachlässigt man die entlastende Wirkung der Druckstreben, kann das Stabwerk analog zu dem Modell der FVK-Verstärkungen durch die Einführung eines horizontalen Druckgurtes vereinfacht werden.

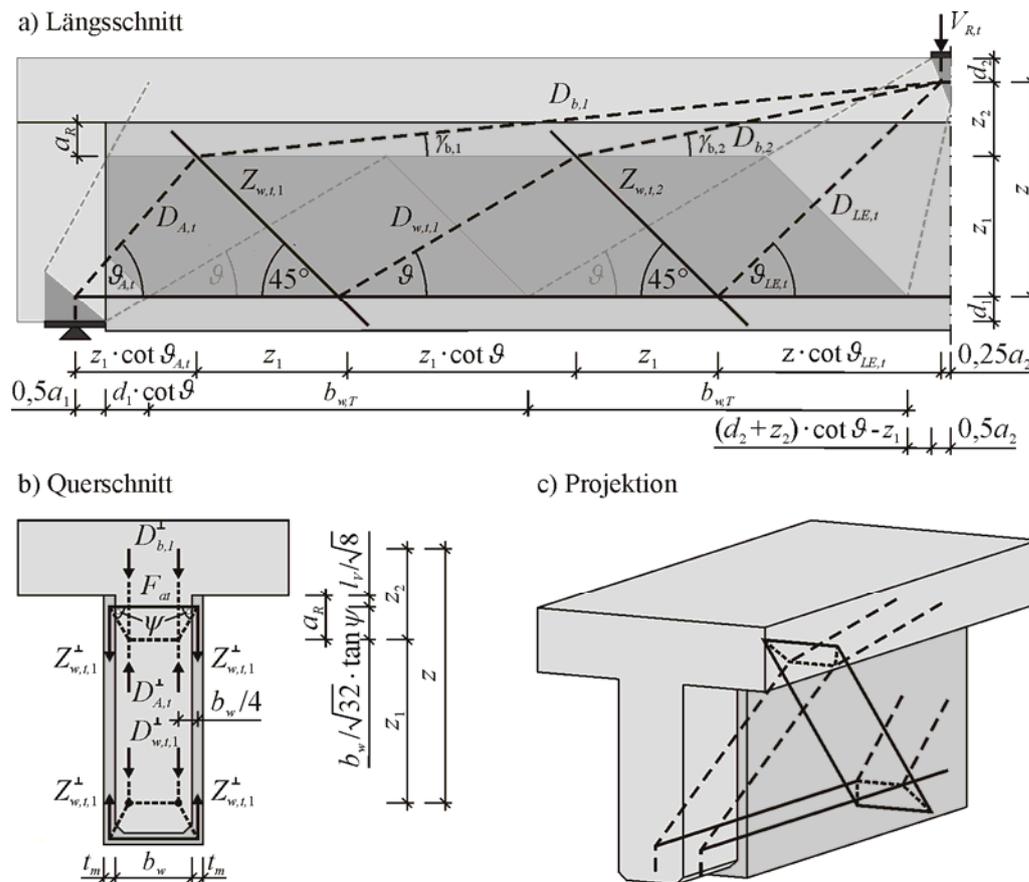


Bild 5: Stabwerkmodell der textilen Bewehrung

Fig. 5: Strut-and-tie model for the textile reinforcement

2.4 Vergleich mit den geprüften Tragfähigkeiten

Eine zutreffende Prognose der Querkrafttragfähigkeit ist mit den verfügbaren Berechnungsmodellen relativ schwierig, wie in Tabelle 3 die Gegenüberstellung mit den geprüften Tragfähigkeiten zeigt. Schon allein die Tragfähigkeit des reinen Stahlbetonbauteils ist nach dem Fachwerkmodell der DIN 1045-1 nicht einmal halb so groß wie die geprüfte Bruchlast. Eine Variation der Stahlspannung zwischen Streckgrenze und Zugfestigkeit ist dabei kaum von Einfluss.

Wesentlich entscheidender für die rechnerische Tragfähigkeit ist die Neigung der Druckstrebe. Diese wurde für die Vergleichsrechnung nach dem Ansatz der DIN 1045-1 bestimmt, wobei als einwirkende Querkraft die jeweils geprüfte Tragfähigkeit angesetzt wurde. Die Abhängigkeit von der geprüften Bruchlast hat zur Folge, dass der Druckstrebenwinkel mit zunehmendem Verstärkungsgrad steiler wird, wie auch die Messungen von BRÜCKNER [16] bestätigen. Der steiler werdende Neigungswinkel ist am abnehmenden Traganteil der Stahlbügelbewehrung erkennbar (Tabelle 3, Spalte 4).

Die Tragfähigkeit der textilbewehrten Verstärkungsschicht wurde mit dem in Abschnitt 2.3 vorgestellten Fachwerkmodell berechnet (Tabelle 3, Spalte 5). Als Zugfestigkeit in Richtung der Faserbewehrung wurde die Bruchspannung im einaxialen Dehnkörperversuch nach JESSE [9] angesetzt. Der Bogen zur Verankerung der textilen Zugstreben (Bild 5b) wurde bezüglich der Neigung im Verankerungsbereich variiert. Als realistisch werden Neigungen zwischen 45 und 60° angesehen (BRÜCKNER [16]).

Tabelle 3: Querkrafttragfähigkeit der Plattenbalken

Table 3: Ultimate load of the specimen

Textile Bewehrung		Bruchlast geprüft [kN]	Anteile nach Fachwerk-Modell		Numerische Struktur- analyse ⁴⁾		Versagensart
Lagen- anzahl	Fläche ¹⁾ [mm ² /m]		Stahl- bügel ²⁾ [kN]	Textil ³⁾ [kN]	Mittel- wert [kN]	Standardab- weichung [kN]	
-	-	466	170-189	-	450	94	Schrägzug
2	88,1	679	160-177	230-245	543	105	Schrägzug
3	132,2	811	149-166	335-355	599	128	Schrägzug, Ver- bund (Bild 2d)

¹⁾ Fläche der textilen Bewehrung je m Balkenlänge, zweischnittig

²⁾ Berechnung nach DIN 1045-1 Gl. (73)+(75), Stahlspannung $f(\varepsilon_{0,2\%}) \leq f_y \leq f(25\text{‰})$

³⁾ Berechnung nach Abs. 2.3, Anstieg des Druckbogens im Verankerungsbereich der Zugstreben (Bild 5d) $45^\circ \leq \psi \leq 60^\circ$

⁴⁾ Ergebnisse nach STEINIGEN ET AL. [17]

Der berechnete Traganteil der textilen Bewehrung liegt in der Größenordnung der Traglaststeigerung, welche sich aus der Differenz der Traglast von verstärktem und unverstärktem Bauteil ergibt (Tabelle 3, Spalte 3+5). Genau genommen müsste der Traganteil sogar etwas größer sein als die Traglaststeigerung, da der Traganteil der Stahlbügelbewehrung mit zunehmendem Bewehrungsgrad sinkt (Tabelle 3, Spalte 4). Im Vergleich zu den querkrafttypischen Streuungen ist diese Abnahme aber eher gering, so dass für das Stabwerkmodell der textilen Bewehrung dennoch von einer guten Übereinstimmung mit dem Versuch ausgegangen werden kann. Die große Abweichung zwischen der rechnerischen Tragfähigkeit der Stahlbügelbewehrung und der Prüflast des unverstärkten Referenzbauteils lässt auf zusätzliche Tragwirkungen schließen (z.B. Dübelwirkung der Längsbewehrung, Querkraftanteil eines geneigten Obergurtes), die mit dem herkömmlichen Fachwerkmodell nicht erfasst werden.

Die Ergebnisse der numerischen Strukturanalyse stimmen für den reinen Stahlbetonbalken sehr gut überein (Tabelle 3, Spalte 3+6). Die Verstärkungswirkung der textilen Bewehrung hingegen wird trotz Ansatz der geprüften Materialeigenschaften deutlich unterschätzt. Die Details der Modellierung sind in STEINIGEN ET AL. [17] beschrieben.

3 Biegeverstärkung

3.1 Allgemeines

An der Technischen Universität Dresden wurden im Rahmen des SFB 528 seit 1999 zahlreiche Versuche zur Bestimmung der Biegetragfähigkeit von textilbetonverstärkten Stahlbetonplatten durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten im Regelfall an Stahlbetonplatten mit einer Spannweite von 1,6 m, einer Plattenbreite von 0,6 m und einer Dicke von 0,1 m. Zur Verstärkung wurden textile Gelege aus alkaliresistentem Glas (Garnfeinheiten von bis zu 2400 tex) oder Carbon (Garnfeinheit von bis zu 800 tex) verwendet. Parallel zu diesen Versuchen erfolgte die Entwicklung von Berechnungsmodellen, mit denen unter anderem die maximale Biegetragfähigkeit der verstärkten Bauteile vorhergesagt werden kann.

Die Überprüfung der Übertragbarkeit der bisher gewonnenen Ergebnisse und Berechnungsmodelle auf deutlich größere Stahlbetonplatten erfolgte in den vergangenen zwei Jahren.

3.2 Probekörper und Versuchsdurchführung

Die untersuchten Stahlbetonplatten waren 7,00 m lang, 1,00 m breit und 0,23 m dick (Bild 6a). Sie besaßen in Längsrichtung eine untere Betonstahlbewehrung von 5Ø12 mm im Abstand von 0,20 m. Als Querbewehrung wurden Ø12 mm im Abstand von 0,15 m gewählt. Die Betondeckung betrug 25 mm.

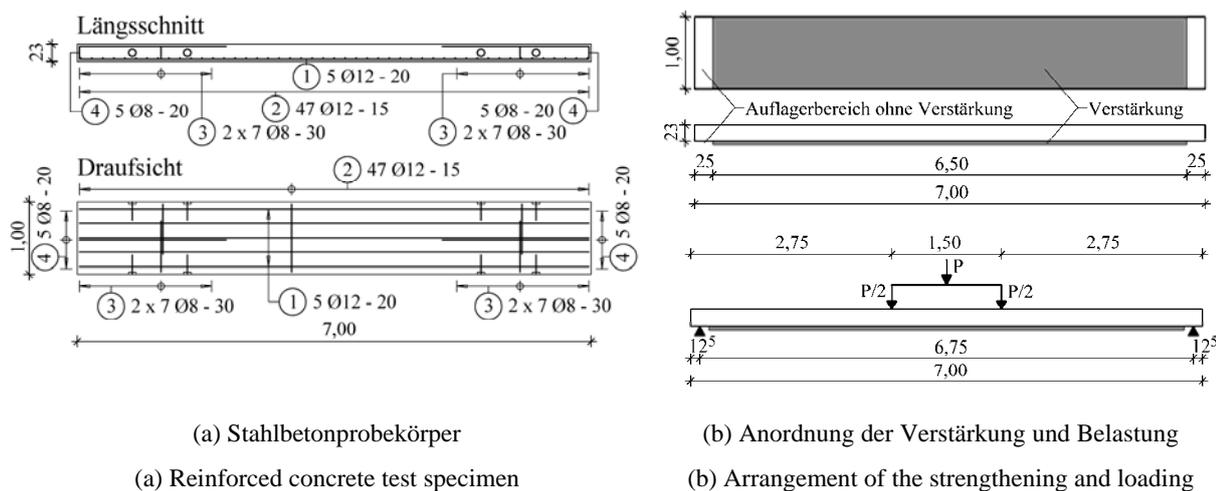


Bild 6: Versuchsplatten für die Biegeverstärkung

Fig. 6: Test slabs for flexural strengthening

Neben einer unverstärkten Referenzplatte wurden vier verstärkte Platten mit ein- bis vier Lagen textiler Bewehrung geprüft. Als textile Bewehrung kam ein Carbongelege (SGL Grid 600) zum Einsatz.

Die Untersuchung der Tragfähigkeit der Platten erfolgte im 4-Punkt-Biegeversuch mit einer Plattenspannweite von 6,75 m. Der Abstand der zwei mittleren Lasteinleitungspunkte betrug 1,5 m (Bild 6b).

3.3 Ingenieurmäßiges Berechnungsmodell

Unter Annahme einer rechteckigen Spannungsverteilung in der Betondruckzone ist eine einfache überschlägige Berechnung der Tragfähigkeit von mit Textilbeton verstärkten Platten möglich. In Bild 7 sind hierfür exemplarisch die Bezeichnungen und Dehnungsverhältnisse am Querschnitt unter Biegebeanspruchung dargestellt.

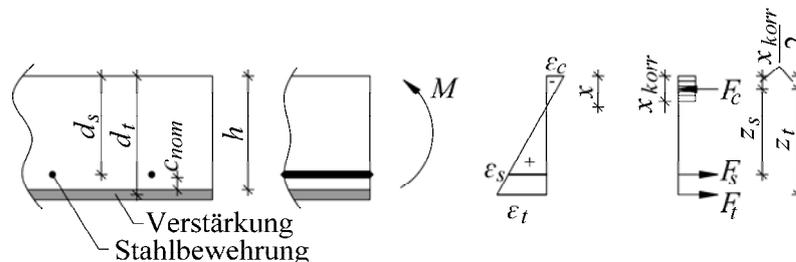


Bild 7: Bezeichnungen und Dehnungsverhältnisse (aus SCHLADITZ ET AL. [18])

Fig. 7: Nomenclature and strain distribution

Unter der Voraussetzung, dass die Betonstahlbewehrung im Grenzzustand der Tragfähigkeit im Fließen ist, kann das Bruchmoment M_u bestimmt werden:

$$M_u = M_s + M_t = F_s \times z_s + F_t \times z_t \quad (1)$$

Eine detaillierte Beispielrechnung findet sich in SCHLADITZ ET AL. [18].

3.4 Ergebnisse

Die textilbetonverstärkten Stahlbetondecken besitzen eine deutlich höhere Tragfähigkeit als die unverstärkte Referenzplatte (Tabelle 4). Mit wachsender Lagenzahl steigt dabei die Tragfähigkeit gleichmäßig an. Bei einer Verstärkung mit 4 Lagen textiler Bewehrung konnte die Tragfähigkeit der Stahlbetondecke auf das 3,5-fache gesteigert werden. Es wurde bei gleichem Lastniveau mit zunehmender Lagenzahl eine Verringerung der Durchbiegungen beobachtet (SCHLADITZ ET AL. [18]).

Tabelle 4: Biegetragfähigkeit der Platten**Table 4:** ultimate load of the specimen

Lagenanzahl	Versuchsergebnis [kNm]	Ingenieurmodell ¹⁾ [kNm]	Berechnungsergebnisse		
			FEM 1 ²⁾ [kNm]	Mittelwert [kNm]	FEM 2 ³⁾ Standardabweichung [kNm]
unverstärkt	66	62	75	69	3,9
1	110	101	109	98	9,1
2	160	144	150	133	9,6
3	191	188	191	166	12,3
4	228	232	231	201	23,5

¹⁾ Ergebnisse des Instituts für Massivbau, Berechnung siehe SCHLADITZ ET AL. [18]

²⁾ Ergebnisse des Instituts für Mechanik und Flächentragwerke

³⁾ Ergebnisse des Instituts für Statik und Dynamik der Tragwerke, Berechnung siehe STEINIGEN ET AL. [17]

Ein Vergleich der experimentell und rechnerisch ermittelten Tragfähigkeiten zeigt Abweichungen von weniger als 10%, siehe Tabelle 4. Dadurch konnte die Anwendbarkeit der in den unterschiedlichen Instituten entwickelten Biegebemessungsmodelle auch für Bauteile mit großen Spannweiten und großen Verstärkungsgraden nachgewiesen werden.

Für eine detaillierte Beschreibung der Versuche und der Berechnungsansätze soll an dieser Stelle auf SCHLADITZ ET AL. [18], WEILAND [19] und STEINIGEN ET AL. [17] verwiesen werden. Des Weiteren sind experimentelle und theoretische Untersuchungen zu reinen Textilbetonplatten in HEGGER ET AL. [20], [21] beschrieben.

4 Normalkraftverstärkung

4.1 Allgemeines

Neben der Querkraft- und Biegeverstärkung wurden im Rahmen des SFB 528 auch Untersuchungen zur Verstärkung von Stützen durchgeführt. Die Traglaststeigerung bei Textilbeton ergibt sich aus der Querschnittserhöhung infolge der zusätzlich aufgebrachteten Betonschicht und aus einer Umschnürungswirkung der textilbewehrten Verstärkungsschicht. Vorangegangene Untersuchungen an Stützenköpfen mit Querschnitten vom Quadrat bis hin zum Kreis mit unterschiedlichen Ausrundungsradien haben gezeigt, dass, in Abhängigkeit von der Geometrie, eine beachtliche Verstärkungswirkung dieser Bauteile erzielt werden kann (ORTLEPP ET AL. [6]). Mit Hilfe von Versuchen an großformatigen Stützen mit realen Bauteilabmessungen sollte die Vorhersagequalität der hierfür entwickelten Rechenmodelle überprüft werden.

4.2 Probekörper und Versuchsdurchführung

Nach Vorliegen der Berechnungsergebnisse wurden drei Stahlbetonstützen mit einer Höhe von 2 m mit rundem Querschnitt (Durchmesser der Altbetonstütze 30 cm) geprüft (Bild 8a). Eine Stütze blieb als Referenzstütze unverstärkt, zwei weitere Stützen wurden über die gesamte Höhe mit fünfzig bewehrtem Textilbeton (Carbongelege siehe Abschnitt 3) verstärkt, wobei eine davon eine zusätzliche zweilagig bewehrte Textilbetonschicht am Stützenkopf und am Stützenfuß erhielt (Bild 8b).

Die Untersuchung der Tragfähigkeit der Stützen erfolgte weggesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,01 mm/s in einer 10-MN-Säulenprüfmaschine (SCHLADITZ ET AL. [22]) der Firma walter+bai ag. Für eine detaillierte Beschreibung der Versuche soll an dieser Stelle auf ORTLEPP ET AL. [6] verwiesen werden.

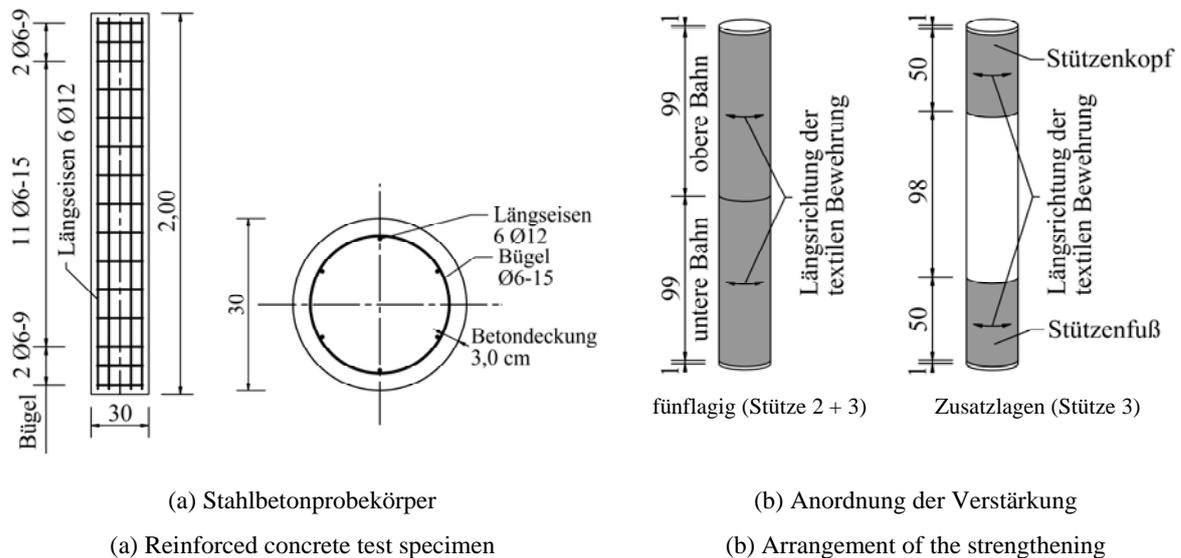


Bild 8: Probekörper für die Stützenversuche

Fig. 8: Test specimens for column tests

4.3 Ingenieurmäßiges Berechnungsmodell

ORTLEPP ET AL. [5] schlagen zur Bemessung des Lasteinleitungsbereiches von mit Textilbeton verstärkten Betonstützen ein zweigeteiltes Modell vor, wobei der größere der beiden Werte für die maximal erzielbare Traglast N_u der Stütze maßgebend wird:

$$N_u = \max(N_{u,1}, N_{u,2}) \quad (2)$$

Der erste Teil $N_{u,1}$ beschreibt dabei die Traglaststeigerung aus dem Normalkraftanteil im Feinbetonmantel und der zweite Teil $N_{u,2}$ die Traglaststeigerung infolge der Umschnürungswirkung der Textilien. Für den Stützenmittelpbereich großformatiger stahlbewehrter Stützen ergeben sich diese Anteile entsprechend ORTLEPP ET AL. [6] zu:

$$N_{u,1} = N_c + N_s + N_{fc} = k_m \times f_{cm} \times A_{c,netto} + \sigma_s(\varepsilon_{cu}) \times A_s + 0,45 \times f_{fcm} \times A_{fc,eff} \quad (3)$$

$$N_{u,2} = k_m \times f_{cm} \times A_c \times \left[1 + 0,27 \times \frac{\sigma_{lu}}{k_m \times f_{cm}} + 5,55 \times \left(\frac{\sigma_{lu}}{k_m \times f_{cm}} \right)^2 - 3,51 \times \left(\frac{\sigma_{lu}}{k_m \times f_{cm}} \right)^3 \right] \dots \quad (4)$$

$$+ \sigma_s(\varepsilon_{cu}) \times A_s$$

Der Effekt des Ablösens bzw. Abschälens der Textilbetonschicht im Lasteinleitungsbereich wird für die Bestimmung von $N_{u,1}$ durch einen zusätzlichen Abminderungsfaktor von 0,6 berücksichtigt:

$$N_{u,1} = N_c + N_s + N_{fc} = k_m \times f_{cm} \times A_{c,netto} + \sigma_s(\varepsilon_{cu}) \times A_s + 0,27 \times f_{fcm} \times A_{fc,eff} \quad (5)$$

Die Anwendung dieses Ingenieurmodells zur Vorhersage der Stützenbruchlast ist ausführlich in ORTLEPP ET AL. [6] beschrieben

4.4 Ergebnisse

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der geprüften Stützen sowie die vorher berechneten Werte. Die Referenzstütze zeigte ein Versagen am Stützenkopf. Die mit fünf Lagen textiler Bewehrung verstärkte Stütze 2 zeigte ein gleichmäßiges Versagen über die gesamte Höhe der Stütze. Bei der Stütze 3, welche mit fünf Lagen und in den Lasteinleitungsbereichen mit sieben Lagen textiler Bewehrung verstärkt war, trat das Versagen in Stützenmitte ein. Die Traglaststeige-

Tabelle 5: Normalkrafttragfähigkeit der Stützen

Table 5: Ultimate load of the specimen

Lagenanzahl	Versuchsergebnis [kN]	Berechnungsergebnis ¹⁾ [kN]
unverstärkt	1.737	2.149 ²⁾ / 1.801 ³⁾
5	3.078	2.852
5/7	3.119	3.134

¹⁾ Ergebnisse des Instituts für Massivbau, Berechnung siehe ORTLEPP ET AL. [6]

²⁾ mit Längsstahlmitwirkung

³⁾ ohne Längsstahlmitwirkung

rung betrug bei beiden verstärkten Stützen ca. 80 %. Sie setzt sich aus ca. 8 % Verstärkungswirkung infolge des Normalkraftanteils der Feinbetonschicht und ca. 72 % Umschnürungswirkung zusammen. Nach dem Erreichen der von der Umschnürung maximal aufnehmbaren Zugspannung versagt das Textil durch Reißen der Fasern. Das Versagen des Versuchskörpers erfolgt allmählich. Die mit Textilbeton verstärkten Stützen zeigten eine sehr große Duktilität.

Mit dem von ORTLEPP ET AL. [5], [6] entwickelten Umschnürungsmodell konnten die experimentell ermittelten Traglasten der verstärkten Stützen gut vorhergesagt werden (Tabelle 5). Das entwickelte Modell bildet somit das Tragverhalten der Verstärkung sehr gut ab.

5 Zusammenfassung

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die erreichbaren Traglasten der mit Textilbeton verstärkten Bauteile mit den entwickelten Berechnungsmodellen recht gut vorhergesagt werden können. Während die (meist empirischen) Ingenieurmodelle als Berechnungsergebnis lediglich die Bruchlasten liefern, sind die Modelle der Institute für Mechanik und Flächentragwerke sowie für Statik und Dynamik der Tragwerke geeignet, die gesamten Kraft-Verformungsbeziehungen vorher zu sagen. Die am Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke entwickelte fuzzy-stochastische Tragwerksanalyse (STEINIGEN ET AL. [17]) bietet zudem den Vorteil, dass unscharfe Eingangsgrößen berücksichtigt werden können.

6 Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung dieser Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 528 sowie den Mitarbeitern des Institutes für Mechanik und Flächentragwerke und des Institutes für Statik und Dynamik der Tragwerke der Technischen Universität Dresden für die enge Zusammenarbeit im Zuge der Vorausberechnung des Tragverhaltens und das zur Verfügung stellen der Ergebnisdaten für diesen Beitrag.

7 Literatur

- [1] BÖSCHE, A.: *Möglichkeiten zur Steigerung der Biegetragfähigkeit von Beton- und Stahlbetonbauteilen durch den Einsatz textiler Bewehrungen – Ansatz für ein Bemessungsmodell*. Dresden. Technische Universität Dresden, Dissertation, 2007
- [2] WEILAND, S.: *Interaktion von Betonstahl und textiler Bewehrung bei der Biegeverstärkung mit textilbewehrtem Beton*. Technische Universität Dresden, Dissertation, 2009

- [3] ORTLEPP, R.; BRÜCKNER A.; CURBACH, M.: Influence of Textile Reinforcement on the Principle Stress Condition of Strengthened RC Beams. In: *3rd International fib Congress, Washington, D.C., 29.05. - 02.06.2010*. DVD-ROM, 2010
- [4] SCHLADITZ, F.; CURBACH, M.: Torsionsversuche an textilbetonverstärkten Stahlbetonbauteilen. *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (2009), Nr. 12, S. 835–843 – doi: 10.1002/best.200900043
- [5] ORTLEPP, R.; LORENZ, A.; CURBACH, M.: Umschnürungswirkung textildbewehrter Verstärkungen im Lasteinleitungsbereich von Stützen in Abhängigkeit von der Geometrie. *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Nr. 7, S. 490–500 – doi: 10.1002/best.201100018
- [6] ORTLEPP, R.; SCHLADITZ, F.; CURBACH, M.: Textilbetonverstärkte Stahlbetonstützen. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Nr. 9, S. 640–648 – doi: 10.1002/best.201100017
- [7] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (HRSG.): *Richtlinie – Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie), Teil I bis IV*. DAfStb. Berlin : Beuth, Ausgabe Oktober 2001
- [8] BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN (HRSG.): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING)*. Dortmund : Verkehrsblatt-Verlag, 2003
- [9] JESSE, F.: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*. Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2004
- [10] ORTLEPP, R.: *Untersuchungen zur Verbundverankerung textildbewehrter Feinbetonverstärkungsschichten*. Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2007
- [11] FIB SPECIAL ACTIVITY GROUP 5: *Model Code 2010*. First complete draft, International Federation for Structural Concrete (fib), Bulletin 55 + 56
- [12] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE (FIP): *Practical Design of Structural Concrete*. Recommendations. London, SETO, 1999
- [13] DIN 1045-1: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. Ausgabe August 2008
- [14] CONCRETE SOCIETY: Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials. *Concrete Society Technical Report*, No 55, Second Edition, Camberley, 2004, ISBN 1 904482 14 7
- [15] ACI 440.2R-08: *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008

- [16] BRÜCKNER A.: *Querkraftverstärkung von Bauteilen mit textilbewehrtem Beton*. Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden, Dissertation, in Vorbereitung
- [17] STEINIGEN, F.; SICKERT, J.-U., HOFFMANN, A.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Tragwerke aus Textilbeton – numerische Strukturanalyse. In: CURBACH, M. (Hrsg.); ORTLEPP, R. (Hrsg.): *Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum 6. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS6)*, Berlin, 19.-20.9.2011, S. 401-412.
- [18] SCHLADITZ, F.; LORENZ, E.; CURBACH, M.: Biegetragfähigkeit von textilbetonverstärkten Stahlbetonplatten. *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011) Nr. 6, S. 377-384 - doi: 10.1002/best.201100002
- [19] WEILAND, S.: *Interaktion von Betonstahl und textiler Bewehrung bei der Biegeverstärkung mit textilbewehrtem Beton*. Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2009
- [20] HEGGER, J.; HORSTMANN, M.; VOSS, S.; WILL, N.: Textilbewehrter Beton – Tragverhalten, Bemessung und Anwendung. *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2009) Nr. 6, S. 362-370
- [21] HEGGER, J.; VOSS, S.: Investigations on the load-bearing behaviour and application potential of Textile Reinforced Concrete. *Engineering Structures* (30), No.7, S. 2050-2056, 2008.
- [22] SCHLADITZ, F.; HAMPEL, T.; ORTLEPP, S.; SCHEERER, S.: Eine neue 10-MN-Prüfmaschine für großformatige Bauteile. *Bautechnik* 88 (2011), Nr. 3, S. 205-210